Das Universum nach Einstein

Von der kosmologischen Konstante zur Dunklen Energie

Norbert Straumann

Mit seiner Allgemeinen Relativitätstheorie entwickelte Einstein vor hundert Jahren eine völlig neue Sicht auf Raum, Zeit und Gravitation. Bereits zwei Jahre danach schlug er ein kosmologisches Modell vor, das zwar nach einem Jahrzehnt überholt war, jedoch unerwartete Entwicklungen auslöste. Insbesondere zeigte sich, dass Raum und Zeit unweigerlich an der kosmischen Dynamik beteiligt sind. Mit dieser sind tiefliegende Rätsel zu Tage getreten, die für die Kosmologie und die Grundlagenphysik von größter Bedeutung sind.

Archives Lemaitre, Université Catholique, Louvain

Albert Einstein um 1933 im Gespräch mit Abbé Georg Lemaître, der als erster die Idee eines expandierenden Universums entwickelte.

Etwa ab dem Jahr 2000 haben Astronomen mit zunehmender Gewissheit nachgewiesen, dass das Universum seit langer Zeit beschleunigt expandiert.[1)] Seither ist die Diskussion um Einsteins kosmologische Konstante erneut entfacht worden und hat sich zum Problem der „Dunklen Energie" ausgeweitet. Die Geschichte um diese Konstante ist nicht nur wechselvoll und interessant, vom Standpunkt der Quantentheorie aus ist ihre tatsächliche Kleinheit auch ein großes Rätsel. Eine befriedigende Deutung ist nicht in Sicht und wohl erst auf der Basis eines einheitlichen Verständnisses der fundamentalen Wechselwirkungen zu erhoffen. Es sei aber schon jetzt betont, dass in den Feldgleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie – einer *klassischen* Feldtheorie – zwei Konstanten *frei* sind und experimentell, also durch Beobachtungen, bestimmt werden müssen. Die Werte beider Konstanten sind sehr merkwürdig: Die Newtonsche Konstante G definiert eine riesig hohe Massenskala, die Planck-Skala von etwa 10^{19} Protonenmassen, während umgekehrt die kosmologische Konstante Λ eine Energiemassendichte definiert, die vom Standpunkt der Elementarteilchenphysik aus gesehen winzig ist.

Die abstoßende Gravitation

In der schlimmsten Zeit des ersten Weltkrieges, am 8. Februar 1917, hielt Einstein vor der Preußischen Akademie der Wissenschaften einen Vortrag über die Anwendung seiner Allgemeinen Relativitätstheorie auf das gesamte Universum. Ein paar Tage vor seinem Referat schrieb er seinem Freund und Kollegen Paul Ehrenfest nach Leiden: „Ich habe wieder etwas verbrochen in der Gravitationstheorie, was mich ein wenig in Gefahr bringt, in ein Tollhaus interniert zu werden."

Es ist interessant zu sehen, welche primären Motive Einstein bei seinem Versuch bewegten. In jenen Jahren war er stark von Ernst Machs Ideen beeinflusst. So schreibt er in seiner Abhandlung [1]: „In einer konsequenten Relativitätstheorie kann es keine Trägheit *gegenüber dem ‚Raume'* geben, sondern nur eine Trägheit der Massen *gegeneinander*". Zur Vorstellung einer Weltinsel (asymptotisch flaches Modell) sagt er ferner: Dann „würde die Trägheit durch die (im Endlichen vorhandene) Materie zwar *beeinflusst* aber nicht *bedingt*. Wenn nur ein einziger Massenpunkt vorhanden wäre, so besässe er nach dieser Auffassung Trägheit". Im Sinne von Mach war Einstein lange der Meinung, dass „das metrische Feld restlos durch die Massen der Körper bestimmt" wird, und nannte diese Forderung in einer kurzen Arbeit das Machsche Prinzip. Nach Mach ist ein lokales Bezugssystem, in welchem die Newtonschen Gesetze gelten, durch die Massenverteilung im Universum bedingt und bestimmt. Einstein schrieb: „Den Namen ‚Machsches Prinzip' habe ich des-

1) *B. Leibundgut*, Eins-a-Vermessung des Universums, Physik Journal, Dezember 2011, S. 27

Prof. Dr. Nobert Straumann, Zelgli 32, 5452 Oberrohrdorf, Schweiz

 1617-9439/15/0303-45

halb gewählt, weil dies Prinzip eine Verallgemeinerung der Machschen Forderung bedeutet, dass die Trägheit auf eine Wechselwirkung der Körper zurückgeführt werden müsse".

Einstein wollte auch die letzten Überbleibsel von Newtons absolutem Raum und absoluter Zeit beseitigen. Erst Jahre später erkannte er, dass das metrische Feld der Allgemeinen Relativitätstheorie, trotz seiner Abhängigkeit von der Materie, eine eigene Existenz bewahrt, ähnlich wie dies z. B. für die elektromagnetischen Felder der Fall ist.

Der amerikanische Astronom Vesto Slipher (1875 bis 1969) beobachtete ab 1912 die Rotverschiebung von Galaxien und legte damit eine wichtige Grundlage für die Vorstellung eines expandierenden Universums.

In diesem Sinne postulierte Einstein 1917, dass das Universum zwar unbegrenzt, aber räumlich endlich ist. Damit entfiel die Notwendigkeit für Randbedingungen. Diese Vorstellung eines räumlich geschlossenen Universums war eine vollständige Novität. Der Einfachheit halber wählte Einstein für sein Modell dieselbe Geometrie, welche die Oberfläche einer Kugel im vierdimensionalen euklidischen Raum besitzt.

Zu seiner großen Überraschung stieß Einstein mit seinem Ansatz auf eine grundsätzliche Schwierigkeit, die bereits frühere Generationen im Rahmen der Newtonschen Theorie erkannt hatten: Seine Feldgleichungen ließen kein statisches Universum zu; entweder musste dieses in sich zusammenfallen oder expandieren. Das war schon Newton klar, der nach einer Intervention von Bishop Bentley in einem Brief vom 25. Februar 1693 deutlich zum Ausdruck brachte, dass die universell anziehende Gravitation kein statisches Universum zulässt. Der Zusammensturz der Fixsterne schien ihm ohne göttliche Intervention unvermeidlich. In seiner eigenen Kopie der zweiten Ausgabe der *Principia* mit Annotationen für die dritte (letzte) Ausgabe schrieb Newton: „[T]he stars would, through their gravity, gradually fall on each other, were they not all carried back by a divine plan."

Aufgrund seines Resultats ergänzte Einstein die ursprünglichen Feldgleichungen vom November 1915 so, dass sie auch eine zusätzliche Abstoßung implizierten. Diese Modifikation ist aber keineswegs willkürlich, denn sie steht im Einklang mit den Prinzipien der Allgemeinen Relativitätstheorie. Die Ergänzung in den Feldgleichungen, von Einstein als „kosmologisches Glied" bezeichnet, ist zudem die einzig mögliche Komplikation.[2] Über dieses Glied führte Einstein eine neue Naturkonstante, die „kosmologische Konstante" ein. Damit war nun ein statisches Universum möglich.

Weshalb war Einstein so darauf versessen, ein statisches Modell zu konstruieren? Dies ist in Anbetracht der sehr beschränkten astronomischen Kenntnisse der damaligen Zeit verständlich. Die beobachteten Pekuliargeschwindigkeiten der Sterne waren, wie Einstein wiederholt betont, alle recht klein. So sagt er am Schluss seiner Arbeit, die Einführung des Zusatzgliedes sei „nur nötig, um eine quasistatische Verteilung der Materie zu ermöglichen, wie es der Tatsache der kleinen Sterngeschwindigkeiten entspricht".

An dieser Stelle sei noch auf die wenig bekannte Tatsache hingewiesen, dass Einstein das kosmologische Glied bereits wesentlich früher in Betracht gezogen hatte, nämlich in seinem ersten Übersichtsartikel im Jahre 1916. Er schreibt in einer Fußnote ([2], S. 319), dieser Term sei zugelassen, lässt ihn aber ohne Kommentar gleich wieder fallen. Was hat er sich dabei wohl gedacht?

Mikroben auf der Seifenblase

Hier lässt sich nicht im Detail schildern, wie sich schließlich nichtstatische Modelle von Alexander Friedmann und Abbé Georg Lemaître im Verlaufe der 1920er-Jahre mit großer Verzögerung durchsetzten [3, 4]. Bis um 1930 waren außer diesen beiden Pionieren alle überzeugt, dass das Universum statisch ist, weshalb die „statischen" Lösungen von Einstein und de Sitter die damalige kosmologische Diskussion dominierten. So hat erstaunlicherweise selbst Hubble in seiner berühmten Arbeit von 1929 kein Wort über das expandierende Universum gesagt. Er interpretierte seine empirisch gefundene Geschwindigkeit-Distanz-Beziehung ganz im Sinne des statisch verstandenen de-Sitter-Modells. Dabei folgte er einer Diskussion von Eddington in der zweiten Auflage seines berühmten Buches „The Mathematical Theory of Relativity" von 1924. Die Behauptung, Hubble habe das expandierende Universum entdeckt, ist übertrieben. Es ist leider immer noch viel zu wenig bekannt, dass dieses Verdienst Lemaître zuzuschreiben ist. Er entdeckte im Jahre 1927 unabhängig Friedmanns dynamische Lösungen der Feldgleichungen. Darüber hinaus verband er diese mit den besten damaligen astronomischen Beobachtungen, nämlich den von Slipher gemessenen Rotverschiebungen von über 40 Galaxien (Nebeln) und Hubbles Distanzbestimmungen zu Andromeda und weiteren nahegelegenen Spiralnebeln sowie dessen Bestimmung der Magnituden von Galaxien, die er 1926 publiziert hatte. Diese Daten benutzte er zwei Jahre vor Hubble für eine erste grobe Bestimmung der „Hubble-Konstante" H_0. Lemaître deutete erstmals die großen Rotverschiebungen nicht als galaktische Flucht, sondern als räumliche *Expansion des Kosmos* und leitete in seiner wichtigsten Arbeit von 1927 die zugehörige einfache allgemeine Formel her. Diese verbindet das Verhältnis von emittierter und beobachteter Frequenz, ν_{em}/ν_{beob}, in folgender Weise mit dem Skalenfaktor $a(t)$, der die Ex-

2) Dies gilt, wenn Ableitungen des metrischen Feldes in den Feldgleichungen höher als zweiter Ordnung ausgeschlossen werden.

pansion des Universums beschreibt:

$$\frac{\nu_{\rm em}}{\nu_{\rm beob}} = \frac{a(t_{\rm beob})}{a(t_{\rm em})} \,.$$

Definitionsgemäß ist darin die linke Seite gleich $1+z$ mit der Rotverschiebung z. Für $z \ll 1$ ergibt sich daraus, wie Lemaître feststellte, eine lineare Beziehung zwischen z und der Helligkeitsdistanz.

Auf der Basis dieser Formel wurde in neuester Zeit die beschleunigte Expansion des Universums entdeckt. In populärer Weise hat Lemaître seine Einsicht im Januar 1929 in Brüssel durch folgenden Vergleich dargestellt: „Die Nebel bleiben im Raum an ihrem Platz, aber die Eigenschaften des Raumes ändern sich mit der Zeit, er dehnt sich aus. Die Dinge verhalten sich so, wie sie Mikroben erscheinen könnten, die sich auf einer Seifenblase befinden. Wenn die Blase sich ausdehnt, kann jede Mikrobe feststellen, dass sich alle Nachbarn von ihr entfernen. Sie hätte dann den Eindruck, aber nur den Eindruck, ein zentraler Punkt zu sein.“ (Ähnliche Schilderungen findet man inzwischen in unzähligen populären Darstellungen. Leider wird aber trotzdem auch noch heute die kosmologische Rotverschiebung oft irrtümlich als Doppler-Effekt gedeutet.) All dies wurde aber noch etwa drei Jahre lang ignoriert oder, wie im Fall von Einstein, gar deutlich abgelehnt.[3]

Die allgemeine Haltung illustriert die folgende Bemerkung von Eddington in einem Vortrag anlässlich eines Meetings der Royal Astronomical Society im Januar 1930: „One puzzling question is why there should be only two solutions. I suppose the trouble is that people look for static solutions.“ Nach einer Intervention von Lemaître studierte Eddington endlich die Arbeit seines früheren „graduate student“ und erkannte, wie auch der zur Zeit in Cambridge anwesende de Sitter, deren große Bedeutung. Eddington sorgte zudem für eine englische Übersetzung für die wichtige Zeitschrift „Monthly Notices of the Royal Astronomical Society“ [6]. Merkwürdigerweise fehlt in dieser der wichtige Abschnitt, in welchem Lemaître die Hubble-Konstante bestimmt. 2011 wurde bekannt, dass Lemaître selbst die Übersetzung vorgenommen hat.[4] Der Briefwechsel mit dem Herausgeber der Zeitschrift zeigt, dass er nicht sonderlich interessiert daran war, die Priorität zu beanspruchen. Er betrachtete es als unnötig, 1931 seine vier Jahre alten Ergebnisse zu wiederholen, da die Qualität der Daten inzwischen verbessert worden war. Dies hatte zur Folge, dass angelsächsische Astronomen und Kosmologen nur selten von diesem wichtigen Beitrag von 1927 Kenntnis haben und Lemaîtres Rolle bis heute unterschätzen.

Die Ausbreitung der Expansion

Unter dem Einfluss von Eddington und de Sitter verbreitete sich die neue Lehre rasch, und es kam zu einem allgemeinen Umschwung oder Paradigmenwechsel, wie man heutzutage sagt. Als Anwendung von Lemaîtres Gleichungen erkannte Eddington, dass Einsteins statisches Modell instabil ist. In einer viel zitierten Arbeit aus dem Jahre 1930 sagt er: „Although not expressly stated, it is at once apparent from his formulae that the Einstein world is unstable – an important fact which, I think has not hitherto been appreciated in cosmogonical discussions“. Tatsächlich war dies aber von Lemaître bereits gezeigt worden. Er konstruierte Lösungen, deren Skalenfaktor anfänglich nahe beim Wert des Einstein-Modells ist, dann langsam und schließlich exponentiell anwächst [4]. Im Unterschied zu den meisten Autoren hat Pauli den Instabilitätsnachweis nicht Eddington, sondern Lemaître zugeschrieben.[5] Man kann sich wundern, weshalb Einstein nicht bereits beim Studium der ersten Friedmannschen Arbeit von 1922 die Instabilität seines Modells erkannt hat. Dies war seine wirkliche „Eselei“, und nicht die Einführung des kosmologischen Gliedes.

Angeregt durch Besuche bei Eddington und des Observatoriums auf dem Mount Wilson änderte Einstein seine kosmologischen Ansichten und publizierte diese in den Sitzungsberichten der Preußischen Akademie der Wissenschaften [7]. In dieser Arbeit verwarf er den kosmologischen Term als überflüssige Komplikation, und dabei blieb er für den Rest seines Lebens. Freilich konnte er diesen Standpunkt nur mit wenig überzeugenden Einfachheits-Argumenten begründen. Eine Minderheit von maßgebenden Kosmologen, z. B. Lemaître und Tolman, waren anderer Ansicht. Aus guten Gründen schrieb dazu Richard C. Tolman in einem Brief vom 14. September 1931 an Einstein: „[S]ince the Λ-term provides the most general possible expression of the second order which would have the right properties for the energy-momentum tensor, a definite assignment of $\Lambda=0$, in the absence of experimental determination of its magnitude, seems arbitrary and not necessarily correct.“

Das Standardmodell von Friedmann und Lemaître ohne kosmologischen Term implizierte mit dem damaligen Wert der Hubble-Konstante ein Alter des Universums, welches im Vergleich zum Alter der Sterne zu klein war. Deshalb wurde der Λ-Term wieder eingeführt, und ein früheres Modell von Lemaître

Tom Alexander / LOA

Vesto Slipher nutzte dieses 24-Zoll-Clark-Teleskop am Lowell-Observatorium in Flagstaff (Arizona) für seine spektrographischen Beobachtungen benutzte.

3) Mehr dazu sowie zu anderen Themen in diesem Aufsatz findet man im sehr empfehlenswerten Buch von Harry Nussbaumer und Lydia Bieri [5].

4) *M. Livio*, Nature **479**, 208 (2011)

5) Siehe die Anmerkung 18 zum kosmologischen Problem in [8].

6) *Ch. Wetterich*, Quintessenz – die fünfte Kraft, Physik Journal, Dezember 2004, S. 43

mit verzögerter Expansion erfuhr eine Wiederbelebung. Das änderte sich in den 1950er-Jahren, als neue astronomische Beobachtungen, vor allem durch Walter Baade am Mt. Palomar-Observatorium, zu einer erheblichen Revision des Hubble-Parameters führten. Aber auch in jüngerer Zeit gab es erneut eine „Alterskrise", zu deren Behebung einmal mehr der kosmologische Term herbeizitiert wurde. Auch andere Gründe wurden in der Vergangenheit ins Feld geführt, welche sich jedoch – nach erweiterten Beobachtungen – als voreilig erwiesen.

Das Rätsel der Vakuumenergie

Aber was bedeutet die kosmologische Konstante physikalisch, oder gibt es vielleicht eine ganz andere Deutung der Beobachtungen? Darüber ist manches zu sagen, aber wir stehen noch immer vor einem großen Rätsel. Im Folgenden möchte ich ausführen, weshalb wir aufgrund der Quantentheorie sehr wahrscheinlich mit einem der tiefsten Mysterien der heutigen Physik konfrontiert sind. Nach moderner Auffassung beruht die kosmologische Konstante auf einer Energiedichte des leeren Raumes. Quantentheoretisch ist das Vakuum ein komplexer Zustand, durchzogen von fluktuierenden Quantenfeldern und Kondensaten mannigfaltiger Art. Zwar ist die heutige Physik nicht imstande, die Vakuumenergie wirklich zu berechnen, aber alle vernünftigen Schätzungen liegen so weit neben den zulässigen Werten, wie dies in der Physik noch nie der Fall war. Trotz vielfacher Bemühungen konnte bis jetzt noch niemand einen halbwegs überzeugenden Ausweg aus diesem Dilemma aufzeigen.

Wolfgang Pauli (hier um 1926 mit Albert Einstein) stellte als erster Überlegungen dazu an, ob die Vakuumenergie des Strahlungsfeldes eine gravitative Wirkung haben könnte.

Zur Erläuterung von Nullpunktsenergien in der Quantenmechanik betrachten wir zunächst den harmonischen Oszillator. Seine Energie (Hamilton-Funktion) ist klassisch und quantenmechanisch als Funktion des Ortes q und des Impulses p durch folgenden Ausdruck gegeben

$$H(p,q) = \frac{1}{2m}p^2 + \frac{1}{2}m\omega^2 q^2 \ ,$$

mit Masse m und Kreisfrequenz $\omega = 2\pi\nu$. Klassisch verschwinden im Grundzustand sowohl die kinetische (erster Term rechts) als auch die potentielle Energie (zweiter Term). Es ist dann also $p = q = 0$ und die Energie ist gleich Null.

In der Quantentheorie ist das anders. Zwar verschwinden im Grundzustand die Erwartungswerte von q und p, nicht aber die Erwartungswerte ihrer Quadrate. Da diese gleich den Schwankungsquadraten sind, genügen sie als Folge der kanonischen Vertauschungsrelationen $[q,p] = i\hbar$ den Heisenbergschen Unschärferelationen $\Delta q \cdot \Delta p \geq \hbar/2$. Diese verhindern, dass die Erwartungswerte für potentielle und kinetische Energie beide beliebig klein werden können. Als Kompromiss ergibt sich eine minimale Grundzustandsenergie der Größe $h\nu/2$.

Das gleiche Phänomen zeigt sich z. B. bei elektromagnetischen Feldern. Dies erkannten bereits Born, Heisenberg und Jordan in ihren Pionierarbeiten von 1925. Man kann nämlich ein (freies) Strahlungsfeld als ein System von unendlich vielen ungekoppelten harmonischen Oszillatoren auffassen, und damit liegt die quantentheoretische Beschreibung auf der Hand. Insbesondere hat das freie Strahlungsfeld eine Grundzustandsenergie, die gleich der Summe der $h\nu/2$ aller Oszillatoren ist. Hier treffen wir nun im einfachsten Fall bereits auf eine grundlegende Schwierigkeit der Quantenfeldtheorie: Die Summe der Nullpunktsenergien der unendlich vielen Oszillatoren divergiert (Ultraviolett-Divergenz).

Ohne Gravitation kümmern wir uns nicht um die Energiedichte des Vakuums, da dann nur Energie*differenzen* beobachtbar sind. Freilich können Unterschiede in Vakuumenergien bei veränderlichen äußeren oder inneren Bedingungen beobachtbare Konsequenzen haben. Ein besonders interessantes Beispiel ist die berühmte Casimir-Kraft von zwei parallelen neutralen Metallplatten oder anderen Anordnungen. Dabei denkt man sich nach Casimir die makroskopischen Körper in einem Strahlungshohlraum eingeschlossen und berechnet die Nullpunktsenergie des durch die Randbedingungen verstimmten Hohlraumes. Die potentielle Energie der makroskopischen Körper ist diese Energie, abzüglich der Nullpunktsenergie des leeren Hohlraumes. Für Einzelheiten und weitere wichtige Beispiele möchte ich auf die einschlägige Literatur verweisen.

Vakuum mit Schwerkraft?

Der erste, der sich gefragt hat, ob die Vakuumenergie des Strahlungsfeldes gravitative Wirkungen haben könnte, war Wolfgang Pauli, und zwar noch vor der neuen Quantenmechanik. In seinen eigenen Worten kam er zum Schluss, dass „dann das Universum nicht einmal bis zum Mond reichen würde". Die zugehörige Rechnung ist sehr einfach: In Einheiten mit $\hbar = c = 1$ ist die Vakuumenergiedichte des Strahlungsfeldes, wenn wir alle Frequenzen kleiner als $\omega_{\max}$ abschneiden:

$$\begin{aligned} \langle \rho \rangle_{\text{vac}} &= \frac{8\pi}{(2\pi)^3} \int_0^{\omega_{\max}} \frac{\omega}{2}\, \omega^2\, d\omega \\ &= \frac{1}{8\pi^2}\, \omega_{\max}^4 \, . \end{aligned}$$

Pauli wählte vermutlich als Wellenlänge zur Abschneidefrequenz den „klassischen Elektronenradius“

$$\omega_{\max} = \frac{2\pi}{\lambda_{\max}} = \frac{2\pi\, m_e}{\alpha}\,.$$

Der zugehörige Radius a des Einstein-Universums wäre dann ($M_{\mathrm{pl}} \equiv 1/\sqrt{G}$)

$$a = \frac{\alpha^2}{(2\pi)^{\frac{2}{3}}}\,\frac{M_{\mathrm{pl}}}{m_e}\,\frac{1}{m_e} \simeq 30\ \mathrm{km}\,.$$

Das ist in der Tat weniger als die Distanz zum Mond.

Wenn wir, wie Pauli, die Kopplung an die Gravitation betrachten, so wirkt die Vakuum-Energiedichte ρ_{vac} wie eine kosmologische Konstante. Dies folgt aus Invarianzgründen, die ich hier nicht ausführen kann. Der Wert der kosmologischen Konstante ist dabei $\Lambda_{\mathrm{vac}} = 8\pi\, G\rho_{\mathrm{vac}}$, mit der Newtonschen Gravitationskonstante G. Nun zeigen die astronomischen Beobachtungen, dass die Energiedichte zur kosmologischen Konstante, falls diese die gesamte Dunkle Energiedichte ausmacht, etwa 70 Prozent der „kritischen Dichte“

$$\rho_{\mathrm{crit}} = \frac{3H_0^2}{8\pi\, G} \simeq (3\times10^{-3}\,\mathrm{eV})^4/(\hbar^3\, c^5)$$

beträgt. Vom Standpunkt der Elementarteilchenphysik ist diese Energiedichte winzig. So ist der Wert von ρ_{vac} in Paulis Abschätzung etwa 10^{40}-mal größer. Dies war zwar eine naive Betrachtung, aber auch Verfeinerungen, welche auf dem heutigen so erfolgreichen Standardmodell der Elementarteilchenphysik beruhen, führen in der Regel zu noch wesentlich größeren Diskrepanzen [9]. Ein typisches Beispiel ist die geschätzte Energie des Higgs-Kondensats. Die kosmologische Konstante definiert auch eine gigantische Längenskala $\Lambda^{-1/2}$ von etwa 10^{28} cm. Bis heute lässt sich diese nicht mit anderen mikrophysikalischen Längenskalen in Verbindung bringen.

Eine überzeugende Antwort auf das Rätsel der Vakuumenergie können wir uns nur von einem einheitlichen Verständnis der fundamentalen Wechselwirkungen erhoffen. Interessante Versuche in dieser Richtung, bekannt unter dem Namen „Stringtheorien“, gibt es schon seit längerer Zeit. Aber auch aus diesen Bemühungen ist bis jetzt kein überzeugender Vorschlag für einen winzigen positiven Wert der kosmischen Vakuum-Energiedichte hervorgegangen.

Einsteins Beitrag von 1917 wirkt also weiter, und sein kosmologisches Glied hat sich zum Problem der Dunklen Energie ausgeweitet.[6)] Die Aufklärung dieses großen Rätsels wird die Kosmologie und die Grundlagenphysik vermutlich noch lange beschäftigen. In absehbarer Zeit dürfte sich zeigen, ob die Dunkle Energie von der Rotverschiebung abhängt. Sollte dies der Fall sein, müsste es neben der Vakuumenergie noch ganz andere Beiträge geben. Spekulationen dazu gibt es viele.

Literatur

[1] *A. Einstein*, Sitzungsber. Königl. Preuß. Akad. Wiss., phys.-math. Klasse **VI**, 142 (1917)
[2] *A. Einstein*, Ann. Physik **49**, 769 (1916)
[3] *A. Friedmann*, Z. f. Phys. **10**, 377 (1922); **21**, 326 (1924)
[4] *G. E. Lemaître*, Ann. Soc. Sci. Brux. A **47**, 49 (1927)
[5] *H. Nussbaumer* und *L. Bieri*, Discovering the Expanding Universe, Cambridge University Press, Cambridge (2009)
[6] *G. E. Lemaître*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **91**, 483 (1931)
[7] *A. Einstein*, Sitzungsber. Königl. Preuß. Akad. Wiss., phys.-math. Klasse **XII**, 3 (1931)
[8] *W. Pauli*, Relativitätstheorie, neu hrsg. v. *D. Giulini*, Springer, Heidelberg (2000)
[9] *N. Straumann*, in: *I.-O. Stamatescu* und *E. Seiler*, Dark Energy, in: Approaches to Fundamental Physics, Springer, Heidelberg (2007), S. 327

DER AUTOR

Norbert Straumann war von 1969 zuerst außerordentlicher und ab 1978 bis 2001 ordentlicher Professor an der Universität Zürich. Von 1997 bis 2002 war er Vorsitzender des Fachbeirats des Albert-Einstein-Instituts (AEI) der Max-Planck-Gesellschaft (Potsdam). Er gilt als ausgewiesener Kenner der Allgemeinen Relativitätstheorie, der er sich in den Siebzigerjahren zuwandte. Hierzu publizierte er, auch über seine Emeritierung hinaus, zahlreiche Fachartikel, mehrere viel beachtete Lehrbücher und hervorragende Arbeiten über historische Aspekte der Gravitation.